

旋回圈試驗方法에 의한 大型船의 針路 安定性 判別方法에 關한 研究

尹 点 東

A Study on the Method of Distinguishing Characteristics of a Large ship's Course Stability Using Data Obtainable from Turning Circle Test Method

Jeom Dong Yun

〈目 次〉

Abstract	1. 旋回圈試驗資料 및 成績圖
記號說明	2. 角速度表 및 角速度特性曲線
I. 序 論	IV. 試驗資料分析에 對한 考察 및 資料를 얻기 위한 旋回圈試驗方法에 對한 提言
II. 理論的인 考察	1. 試驗資料分析에 對한 考察.
1. 運動方程式에 對한 考察	2. 資料를 얻기 爲한 旋回圈試驗方法
2. 계속하여 一定舵角을 주었을 때의 角速度를 表示하는 數式 및 角速度特性曲線	V. 結 論
III. 實船의 旋回圈圖分析	參考文獻

Abstract

If an instantaneous external force disturbs a ship running on a straight course, her possible turning responses induced by it with her rudder fixed at zero may be classified in three ways as follows:

1. The ship deviates from the original course beginning turning motion but settles down on a new direction after a while resuming straight line motion.
2. The ship performs the motion of the same kind as that of above 1 but on the process of settling down motion its angular velocity decreases with oscillation.
3. The ship deviates from the original course beginning turning motion and keeps unstable turning without resuming new straight line running.

If a ship does not possess course stability the unstable tendency will much affect the safe conducting of its intended works and sailing.

Therefore, nowadays many shipyards add a kind of course stability tests of a newly built big ship expending time and money for it.

If a method of finding course stability tendencies on the process of performing turning circle tests is to be devised, it will relieve them from an extra kind of test that cost time and money.

In this paper the author analyzed mathematically each of the turning characteristics of the fore mentioned three responding ways and devised a new method of finding tendencies of course stability using the data obtainable from turning circle test method.

The author made each generalized angular velocity characteristic curve according to each way of ship responses to rudder making moments and compared them with each other. We can discern the difference between the curves.

The author also analyzed data of turning circle tests of a ship that was found having satisfying course stability and made angular velocity characteristic curves of it under various conditions and found all of the curves having same kind of characteristic expected from the point of mathematical analysis.

記號說明

- X, Y : 各水平軸方向의 힘
 N : 旋回偶力
 V : 質点의 速度
 m : 船体質量
 u, \dot{u} : x 軸方向의 速度 및 加速度
 v, \dot{v} : y 軸方向의 速度 및 加速度
 $\phi, \dot{\phi}, \ddot{\phi}$: 船首方位角의 角變位量, 角速度, 角加速度
 I_z : z 軸周圍의 慣性모우멘트
 x_G : 原点으로부터 質点까지의 x 軸上에서의 距離, 船首方向을 (+) 反對方向을 (-)로 함
 L : 船体길이
 δ : 舵 角
 $\delta(t)$: 衝擊函數

Y_v, N_v : 大字에 첨자를 한 것은 $\frac{\partial Y}{\partial v}$, $\frac{\partial N}{\partial v}$ 와 같은 微係數를 表示한다.

- ρ : 물의 密度
 m_x : x 軸方向의 附加質量
 m_y : y 軸方向의 附加質量
 i_z : z 軸周圍의 附加慣性모우멘트

無次元化한 數值

$$m' : \frac{m}{\frac{\rho}{2} L^3} \quad m_x' : \frac{m+m_x}{\frac{\rho}{2} L^3} \quad m_y' : \frac{m+m_y}{\frac{\rho}{2} L^3}$$

$$I_z' : \frac{I_z+i_z}{\frac{\rho}{2} L^5}$$

$$\begin{aligned}
 v' & : v \frac{1}{V} & \dot{v}' & : \dot{v} \frac{L}{V^2} \\
 \phi' & : \phi \frac{L}{V} & \dot{\phi}' & : \dot{\phi} \frac{L^2}{V^2} \\
 Y_v' & : \frac{Y_v}{\frac{\rho}{2} L^2 V} & Y_{\dot{v}}' & : \frac{Y_{\dot{v}}}{\frac{\rho}{2} L^3} \\
 Y_{\phi}' & : \frac{Y_{\phi}}{\frac{\rho}{2} L^3 V} & Y_{\dot{\phi}}' & : \frac{Y_{\dot{\phi}}}{\frac{\rho}{2} L^4} \\
 Y_{\ddot{\phi}}' & : \frac{Y_{\ddot{\phi}}}{\frac{\rho}{2} L^2 V^2} & & \\
 N_v' & : \frac{N_v}{\frac{\rho}{2} L^3 V} & N_{\dot{v}}' & : \frac{N_{\dot{v}}}{\frac{\rho}{2} L^4} \\
 N_{\phi}' & : \frac{N_{\phi}}{\frac{\rho}{2} L^4 V} & N_{\dot{\phi}}' & : \frac{N_{\dot{\phi}}}{\frac{\rho}{2} L^5} \\
 N_{\ddot{\phi}}' & : \frac{N_{\ddot{\phi}}}{\frac{\rho}{2} L^3 V^2} & & \\
 X_G' & : \frac{X_G}{L} & & \\
 u' & : \frac{U}{V} & & \\
 a_1 & : m_y' & a_2 & : m_y' x_G' \\
 b_1 & : Y_v' & b_2 & : 0 \\
 c_1 & : m' x_G' & c_2 & : I_z' \\
 d_1 & : m_x' u' & d_2 & : m_x' u' x_G' + N_{\dot{v}}' \\
 K_1 & : Y_{\phi}' & K_2 & : N_{\ddot{\phi}}' \\
 b' & : \frac{a_1 d_2 + b_1 c_2 - a_2 d_1}{a_1 c_2 - a_2 c_1} & c' & : \frac{b_1 d_2}{a_1 a_2 - a_2 c_1} \\
 k_1 & : \frac{a_1 K_2 + a_2 K_1}{a_2 c_1 - a_1 c_2} & k_2 & : \frac{b_1 K_2}{a_2 c_1 - a_1 c_2} \\
 \zeta & : \frac{b'}{2} & \eta & : \frac{c'}{\zeta^2} \\
 \mu & : 0 < \mu < 1 & & \\
 \kappa_1 & : \frac{(1 + \mu) k_1 \zeta - k_2}{2 \mu \zeta} & \kappa_2 & : \frac{k_2 - (1 - \mu) k_1 \zeta}{2 \mu \zeta} \\
 \alpha & : \zeta (1 + \mu) & \beta & : \zeta (1 - \mu)
 \end{aligned}$$

I. 序 論

直進中인 船舶에 잠시 外力이 加하여졌다가 除去되면 이 外力으로 因하여 誘發되는 進行運動은 다음의 세가지 境遇로 大別할 수 있다.

1. 船體는 回頭를 시작하여 漸減되는 角速度로 旋回運動을 하다가 一定角變位量後에는 한 方向에

定針하려고 한다.

2. 船체는 回頭를 시작하나 角速度가 減衰振動을 하면서 一定角變位量後에는 한 方向에 定針하려고 한다.⁴⁾

3. 일단 回頭가 이루어지면 舵를 使用하기 前에는 不安定한 角速度로 旋回運動을 지속하고 한 方向에 定針하지 아니한다.

本論文의 研究目的은 위의 세가지 경우가 어떠한 條件下에서 생기게 되는가를 糾明하고 이러한 狀態를 新造船이 建造되면 通常的으로 行하고 있는 旋回圈試驗方法에서 얻어지는 資料를 어떻게 分析檢討하면 判別할 수 있는가를 考察하는 데 있다.

現在는 造船所에서 新造船이 建造되면 大型船에 있어서는 習慣的으로 行하여 오고 있는 旋回圈試驗에 追加하여 針路安定性試驗으로서 Z試驗 또는 Spiral試驗을 行하고 있다. 그러나 이 Z試驗은 많은 試驗要員과 長時間의 航海時間을 要하고 또한 대단히 번잡스럽고 非經濟的이다. 그리고 또 Z試驗에 있어서는 試驗後에 行하는 計算過程이 번잡하므로 대개의 경우 試驗을 하고서도 必要的 計算을 하지 아니한다.

그러므로 旋回圈試驗方法에 의하여 針路安定性を 判別할 수 있으면 造船所는 試運轉費用을 크게 줄일 수 있고 또한 번잡스러운 일을 덜게 된다.

前述한 船體運動의 세가지 경우에 對하여는 여러 先進造船國의 學者들에 의하여 많은 研究가 이루어져 있고 또한 大略의 原因도 糾明되어 있는 狀態이다.⁴⁾

前述한 第1의 境遇는 通常船舶이면 가지고 있는 性質로서 別問題가 되지 아니하며 第2의 境遇는 現實的으로는 그러한 船舶이 잘 없다고 主張되고 있다.⁴⁾ 第3의 境遇는 大端히 큰 問題가 있고 現在 이것때문에 造船所에서는 大型新造船이 建造되면 번잡스러운 安定性試驗을 하고 있다함은 前述한 바와 같다. 筆者가 이러한 方法的인 研究에 着手하게 된 것은 VLCC는 旋回時 角速度가 安定될 무렵에는 旋回速力이 直進時의 그것에 比하여 너무나 크게 떨어지는 것을 보았기 때문이다. 例를 들면 16 knots로 달리는 船舶이 旋回를 始作하면 旋回末期에 있어서는 速力은 約 5 knots 程度까지 떨어진다.

이러한 船體가 旋回할 때 重心이 流壓中心과 一致하지 아니하면 角速度가 增加함에 따라 前進速力이 현저히 減少하여 舵壓에 의한 回頭 moment가 떨어지는 反面 遠心力에 의한 偶力作用은 增加하게 될 것이다. 이러한 境遇에 遠心力에 의한 偶力作用이 舵壓에 의한 回頭作用을 相殺하는 境遇와 돕는 境遇는 船體의 旋回運動特性이 크게 달리 나타날 것이다. 그러나 現實的으로 이러한 現象이 두드러지게 나타나지 아니하므로 우리는 視覺的으로 이러한 것을 잘 觀察할 수는 없을 것이다.

筆者는 이러한 現象이 두드러지게 나타나지 아니하고 觀察이 困難한 理由는 船體에 外力이 加하여 졌다가 消滅하는 境遇는 물의 抵抗moment에 比하여 消滅하여 가는 遠心力에 의한 偶力作用이 너무 弱하기 때문이라고 判斷하였다. 계속하여 一定舵角을 주어서 回頭를 시키고 遠心力에 의한 偶力作用을 誘發시키면 이것이 소란偶力으로 作用하여 角速度에 影響을 미칠 것이나 turning circle의 形成은 圓周速度와 角速度가 合하여 이루어지는 것이므로 時間을 變數로 하여 角速度를 알아보기 前에는 이러한 것은 잘 나타나지 아니할 것이다.

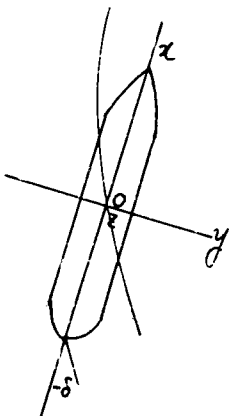
따라서 이러한 것을 알아보기 위하여는 一定舵角으로 船體를 回頭시키면서 時刻에 따른 角變位量을 調査하여야 한다. 數學的으로 말하면 Impulse應答에 의하여 船體運動特性에 對한 傳達函數를 얻고 여기에 人力으로서 $u(t)$ 를 넣어서 調査하는 것이다.

筆者는 이러한 方法을 數式으로 考察하고 船體旋回時의 大略의 角速度特性曲線을 그려 보았다. 그리고 現代造船所에서 建造한 VLCC의 旋回試驗圖를 分析檢討하고 그 角速度特性曲線을 graph로 表示하여 한 船舶이 갖는 旋回特性을 표출시켰고 旋回圈試驗方法에 의하여 얻은 資料를 分析하면 針路安定性的 判斷도 可能함을 表示하였다.

II. 理論的인 考察

1. 運動方程式에 對한 考察

船體의 縱方向中心을 通하는 三直較軸에서 船首方向을 $+x$, 右舷正橫方向을 $+y$, 船底方向을 $+z$ 軸으로 定하면 各軸方向은 <그림 1>과 같다. 角變位置은 時計方向이 (+) 反對方向이 (-)이다.



이러한 境遇의 運動方程式은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} (m+m_y)\dot{v} + Y_v v + m x_G \dot{\phi} + (m+m_x)u\dot{\phi} &= Y \\ (m+m_y)\dot{v} x_G + (I_z + i_x)\dot{\phi} + \{(m+m_x)u x_G + N_\phi\}\dot{\phi} &= N \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

(1)式의 Y에 $Y_\delta \delta_0$, N에 $-N'_\delta \delta_0$ 를 넣고 無次元化 하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} m_y' \dot{v}' + Y_v v' + m x_G' \dot{\phi}' + m_x' u' \dot{\phi}' &= Y'_\delta \cdot \delta_0 \\ m_y' x_G' \dot{v}' + I_z' \dot{\phi}' + (m_x' u' x_G' + N'_\phi) \dot{\phi}' &= -N'_\delta \cdot \delta_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

(2)式의 各項을 記號로 表示하고 δ_0 에 衝擊函數 $\delta(t)$ 를 넣고 Laplace變換 하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L}\{m_y' \dot{v}' + Y_v v' + m x_G' \dot{\phi}' + m_x' u' \dot{\phi}'\} &= Y'_\delta \mathcal{L}\{\delta(t)\} \\ \mathcal{L}\{m_y' x_G' \dot{v}' + I_z' \dot{\phi}' + (m_x' u' x_G' + N'_\phi) \dot{\phi}'\} &= -N'_\delta \mathcal{L}\{\delta(t)\} \\ (a_1 s + b_1) V'(s) + (c_1 s + d_1) \Phi'(s) &= K_1 \\ (a_2 s + b_2) V'(s) + (c_2 s + d_2) \Phi'(s) &= -K_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

<그림 1>

단, $b_2=0$

(3)式에서 $V'(s)$ 를 消去하고 $\Phi'(s)$ 를 求하면 다음과 같다.

$$\Phi'(s) = \frac{-(a_1 K_2 + a_2 K_1) s - b_1 K_2}{(a_1 c_2 - a_2 c_1) s^2 + (a_1 d_2 + b_1 c_2 - a_2 d_1) s + b_1 d_2} \dots\dots\dots(4)$$

(4)式의 各項을 s^2 의 係數 $(a_1 c_2 - a_2 c_1)$ 으로 除하면 다음과 같다.

$$\Phi'(s) = \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + b' s + c'} \dots\dots\dots(5)$$

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + b' s + c'} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

(6)式에서 $b'=2\zeta$, $c'=\eta\zeta^2$ 으로 놓으면

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + 2\zeta s + \eta\zeta^2} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

式(7)을 微係數項들로 바꾸어 보면 다음과 같다.

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{\frac{m_y' (N'_\delta + m_y' x_G' Y'_\delta)}{m_y' (m' x_G'^2 - I_z')} + \frac{Y_v' N'_\delta}{m_y' (m' x_G'^2 - I_z')}}{s^2 + \frac{m_y' N'_\delta + Y_v' I_z'}{m_y' (I_z' - m_x' x_G'^2)} s + \frac{Y_v' (m_x' u' x_G' + N'_\phi)}{m_y' (I_z' - m_x' x_G'^2)}} \right\} \dots(8)$$

式(8)에서 s 係數는 항상 (+)이므로 $\zeta > 0$ 의 條件은 항상 滿足된다. 그러나 η 의 크기는 x_G' 의 값에 따라서 左右되고 η 는 다음의 네가지 境遇가 있을 수 있다.

- (1) $\eta > 1$, (2) $1 > \eta > 0$, (3) $\eta = 1$ (4) $\eta < 0$

위의 各境遇의 Impulse 應答을 調査하여 보면 다음과 같다.

(1) $\eta > 1$ 일 때 [x_G' 가 (+)로 클 때]

$$s^2 + 2\zeta s + (1 + \mu^2)\zeta^2 = 0 \quad \mu > 0$$

$$s = -\zeta \pm i\mu\zeta$$

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1 s + k_2}{(s + \zeta)^2 + \mu^2 \zeta^2} \right\}$$

$$\phi'(t) = \frac{1}{\mu \zeta} e^{-\zeta t} \left\{ (k_2 - k_1 \zeta) \sin \mu \zeta t + k_1 \mu \zeta \cos \mu \zeta t \right\}$$

$$= \frac{1}{\mu \zeta} e^{-\zeta t} \sqrt{(k_2 - k_1 \zeta)^2 + (k_1 \mu \zeta)^2} \sin(\mu \zeta t + \theta)$$

$$\therefore \phi(t) = A e^{-\zeta t} \sin(\omega t + \theta) \dots\dots\dots(9)$$

(2) $\eta=1$ 일 때 [x'_G 가 0에 가까울 때]

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1 s + k_2}{(s + \zeta)^2} \right\}$$

$$\phi'(t) = (k_1 + k_2 t) e^{-\zeta t} \dots\dots\dots(10)$$

(3) $0 < \eta < 1$ 일 때 [x'_G 가 (-)의 적은 값일 때]

$$s^2 + 2s\zeta + (1 - \mu^2)\zeta^2 = 0 \quad 0 < \mu < 1$$

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1 s + k_2}{[s + (\zeta + \mu \zeta)][s + (\zeta - \mu \zeta)]} \right\}$$

$$\phi'(t) = \kappa_1 e^{-\alpha t} + \kappa_2 e^{-\beta t} \dots\dots\dots(11)$$

단,

$$\kappa_1 = \frac{(1 + \mu)k_1 \zeta - k_2}{2\mu \zeta}, \quad \kappa_2 = \frac{k_2 - (1 - \mu)k_1 \zeta}{2\mu \zeta}$$

$$\alpha = \zeta(1 + \mu), \quad \beta = \zeta(1 - \mu)$$

(4) $\eta < 0$ 일 때 [x'_G 가 (-)로 클 때]

$$s^2 + 2\zeta s - \eta^2 \zeta^2 = 0$$

$$(s + \zeta)^2 - \mu^2 \zeta^2 = 0 \quad \mu > 1$$

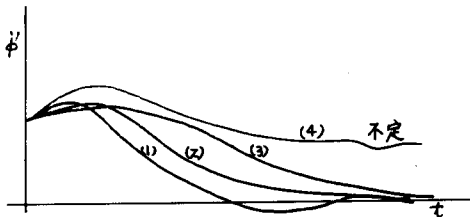
$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1 s + k_2}{[s + (\zeta + \mu \zeta)][s + (\zeta - \mu \zeta)]} \right\}$$

$$\phi'(t) = \frac{k_1(-\zeta - \mu \zeta) + k_2}{-2\mu \zeta} e^{-\zeta(1+\mu)t} + \frac{k_1(-\zeta + \mu \zeta) + k_2}{2\mu \zeta} e^{-\zeta(1-\mu)t}$$

$$\phi'(t) = \frac{k_1 \zeta(1 + \mu) - k_2}{2\mu \zeta} e^{-\zeta(1+\mu)t} + \frac{k_2 - k_1 \zeta(1 - \mu)}{2\mu \zeta} e^{-\zeta(1-\mu)t}$$

$$\phi'(t) = \kappa_1 e^{-\alpha t} + \kappa_2 e^{-\beta t} \dots\dots\dots(12)$$

한 船舶의 微係數值를 決定하기 前에는 具體的인 針路 安定特性曲線을 그릴 수는 없겠으나 大略의 形態는 <그림 2>와 같이 나타날 것이다. 그러나 <그림 2>와 같은 狀態로 旋回運動을 觀測하는 것은 現實的으로 不可能하다. 이러한 現象을 實測하려면 계속하여 入力을 넣어서 그리는 旋回圈을 利用하는 것이 좋다.



<그림 2> 針路安定性特性曲線

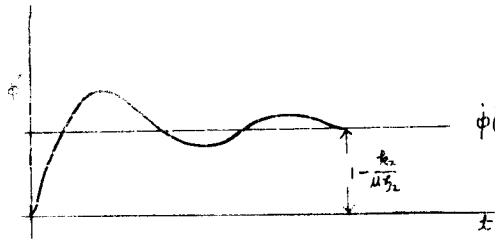
2. 계속하여 一定舵角을 주었을 때의 角速度를 表示하는 數式 및 角速度特性曲線

한 系의 Impulse應答은 곧 그 系의 傳達函數 G(s)가 되므로 舵를 계속하여 使用하는 境遇의 角速度는 다음 式으로 주어진다.

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \{ G(s) \cdot u(s) \} \dots\dots\dots(12)$$

(1) $\eta > 1$ 일 때

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1}{(s + \zeta)^2 + \mu^2 \zeta^2} + \mathcal{L}^{-1} \left\{ -\frac{k_2}{[(s + \zeta)^2 + \mu^2 \zeta^2]s} \right\} \right\}$$



$$\phi'(t) = \frac{k_1}{\mu\zeta} e^{-\zeta t} \sin \mu\zeta t + \frac{k_2}{\zeta^2 + \mu^2\zeta^2} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{\zeta^2 + \mu^2\zeta^2}}{\mu\zeta} e^{-\zeta t} \sin(\mu\zeta t + \theta) \right\} \dots\dots\dots(13)$$

(2) η=1 일 때

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1}{(s+\zeta)^2} \right\} + \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_2}{(s+\zeta)^2 s} \right\}$$

<그림 3> η>1 때의 特性曲線

$$\phi'(t) = \frac{k_2}{\zeta^2} + e^{-\zeta t} \left\{ (k_1 - \frac{k_2}{\zeta})t - \frac{k_2}{\zeta^2} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

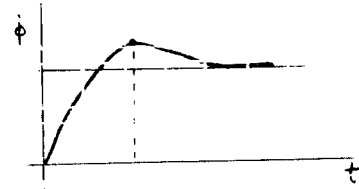
$$\phi'(t) = \phi'(0) = k_1$$

$$\phi'(t) = 0 \quad t = \frac{k_1}{\zeta k_1 - k_2}$$

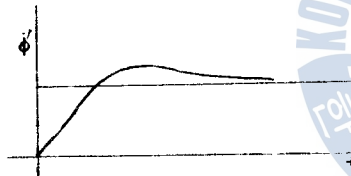
or $-\infty$

(3) 0 < η < 1 일 때

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1}{[s+(\zeta+\mu\zeta)][s+(\zeta-\mu\zeta)]} \right\} + \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_2}{[s+(\zeta+\mu\zeta)][s+(\zeta-\mu\zeta)s]} \right\}$$



<그림 4> η=1 때의 角速度特性曲線



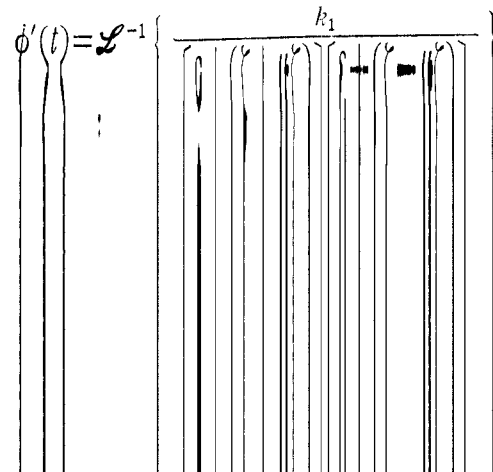
$$\phi'(t) = \frac{k_2}{\zeta^2 - \mu^2\zeta^2} - \frac{k_1}{2\mu\zeta} e^{-\zeta(1+\mu)t} + \frac{k_1}{2\mu\zeta} e^{-\zeta(1-\mu)t} + \frac{k_2}{2\mu\zeta^2(1+\mu)} e^{-\zeta(1+\mu)t} - \frac{k_2}{2\mu\zeta^2(1-\mu)} e^{-\zeta(1-\mu)t} \dots\dots\dots(15)$$

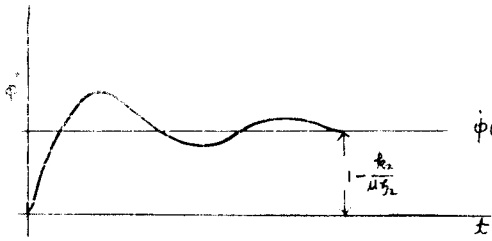
<그림 5> 0 < η < 1 때의 角速度特性曲線

$$\phi'(t) = \kappa + \kappa_1 e^{-d_1 t} + \kappa_2 e^{-d_2 t} \dots\dots\dots(16)$$

(4) η < 0

$$\begin{aligned} s^2 + 2\zeta s - \eta\zeta^2 &= 0 \\ s^2 + 2\zeta s + \zeta^2 - \zeta^2 - \eta\zeta^2 &= 0 \\ (s+\zeta)^2 - \zeta^2(1+\eta) &= 0 \\ (s+\zeta)^2 - \mu^2\zeta^2 &= 0 \quad \mu > 1 \end{aligned}$$





<그림 3> η > 1 때의 特性曲線

$$\phi'(t) = \frac{k_1}{\mu^2 \zeta^2} e^{-\zeta t} \sin \mu \zeta t + \frac{k_2}{\zeta^2 + \mu^2 \zeta^2} \left\{ 1 - \frac{\sqrt{\zeta^2 + \mu^2 \zeta^2}}{\mu \zeta} e^{-\zeta t} \sin (\mu \zeta t + \theta) \right\} \dots \dots \dots (13)$$

(2) η = 1 일 때

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1}{(s + \zeta)^2} \right\} + \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_2}{(s + \zeta)^2 s} \right\}$$

$$\phi'(t) = \frac{k_2}{\zeta^2} + e^{-\zeta t} \left\{ (k_1 - \frac{k_2}{\zeta}) t - \frac{k_2}{\zeta^2} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

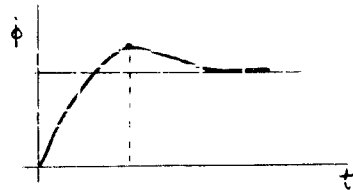
$$\phi'(t) = \phi'(0) = k_1$$

$$\phi'(t) = 0 \quad t = \frac{k_1}{\zeta k_1 - k_2}$$

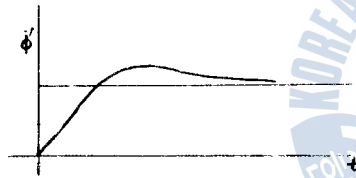
or -∞

(3) 0 < η < 1 일 때

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1}{[s + (\zeta + \mu \zeta)][s + (\zeta - \mu \zeta)]} \right\} + \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_2}{[s + (\zeta + \mu \zeta)][s + (\zeta - \mu \zeta)]s} \right\}$$



<그림 4> η = 1 때의 角速度特性曲線



<그림 5> 0 < η < 1 때의 角速度特性曲線

$$\phi'(t) = \frac{k_2}{\zeta^2 - \mu^2 \zeta^2} - \frac{k_1}{2\mu \zeta} e^{-\zeta(1+\mu)t} + \frac{k_1}{2\mu \zeta} e^{-\zeta(1-\mu)t} + \frac{k_2}{2\mu \zeta^2(1+\mu)} e^{-\zeta(1+\mu)t} - \frac{k_2}{2\mu \zeta^2(1-\mu)} e^{-\zeta(1-\mu)t} \dots \dots \dots (15)$$

$$\phi'(t) = \kappa + \kappa_1 e^{-\beta_1 t} + \kappa_2 e^{-\beta_2 t} \dots \dots \dots (16)$$

(4) η < 0

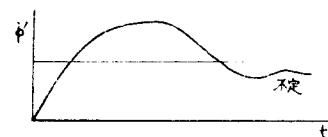
$$\begin{aligned} s^2 + 2\zeta s - \eta \zeta^2 &= 0 \\ s^2 + 2\zeta s + \zeta^2 - \zeta^2 - \eta \zeta^2 &= 0 \\ (s + \zeta)^2 - \zeta^2(1 + \eta) &= 0 \\ (s + \zeta)^2 - \mu^2 \zeta^2 &= 0 \quad \mu > 1 \end{aligned}$$

$$\phi'(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_1}{[s + (\zeta + \mu \zeta)][s + (\zeta - \mu \zeta)]} \right\} + \mathcal{L}^{-1} \left\{ \frac{k_2}{[s + (\zeta + \mu \zeta)][s + (\zeta - \mu \zeta)]s} \right\}$$

$$\phi'(t) = \frac{k_2}{\zeta^2 - \mu^2 \zeta^2} - \frac{k_1}{2\mu \zeta} e^{-\zeta(1+\mu)t} + \frac{k_1}{2\mu \zeta} e^{-\zeta(1-\mu)t} + \frac{k_2}{2\mu \zeta^2(1+\mu)} e^{-\zeta(1+\mu)t} - \frac{k_2}{2\mu \zeta^2(1-\mu)} e^{-\zeta(1-\mu)t} \dots \dots \dots (17)$$

$$\phi'(t) = \kappa + \kappa_1 e^{-\beta_1 t} + \kappa_2 e^{-\beta_2 t} \dots \dots \dots (18)$$

$$\phi'(0) = k_1$$

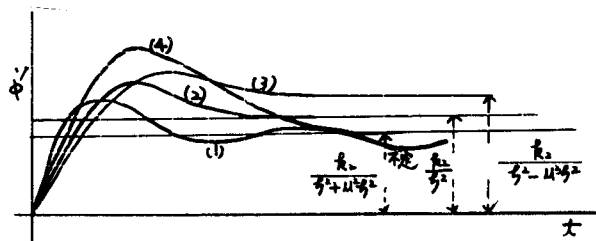


<그림 6> η < 0 일 때의 角速度特性曲線

$$\phi'(t) = 0$$

$$t = \xi' \text{ or } -\infty \text{ or } \infty \text{ (不定)}$$

그러나 大角度舵를 쓸 때는 現實的으로 있다. 이 상을 綜合하면 角速度特性曲線은 다음과 같이 될 것이다.



Ⅲ. 實船의 旋回圈圖分析

〈그림 7〉 角速度特性曲線

1. 旋回圈試驗資料 및 成績圖

다음에 表示하는 船舶의 明細, 旋回圈試驗資料 및 成績圖表는 蔚山 現代造船所에서 1975年 10月에 建造完了한 大型船에 關한 것이다.

船名: ALTHEA(現代造船所建造)

〈表 1〉

船 舶 明 細

日 字	1975. 8. 2	針 路	울 산 外 港	060°	242°
P. D.	Lpp 305m	B _m 53m	D _m 25.3m	d _m 19.66m	
主 機	Max. SHP 36000×90	R. P. M.	Normal SHP 35000×89	R. P. M.	
Nozzle	Type SOLID	Blades 5			
Propeller	Dia. 8.15m	Pitch 8.01m	Pitch R. 0.9828	Boss Ratio 0.1963	
滿 載 時	C _b 0.8220	C _p 0.8261	C _T 0.9951	Disp 268,097t	
輕 荷 時	C _b 0.7811	C _p 0.7888	C _T 0.9902	Disp 128,152t	
其 他	水深 120m	Propeller Immersion 滿載時: 1/D _P 164%, 輕荷時: 1/D _P 59%			

1: Vertical distance between shaft center line and water surface.

D_P: Propeller diameter

<表 2>

NORMAL TURNING TRIAL

(FULLY LOADED COND.)

RIGHT TURNING TRIAL

INITIAL SHIP'S SPEED: 16.86 KNOTS

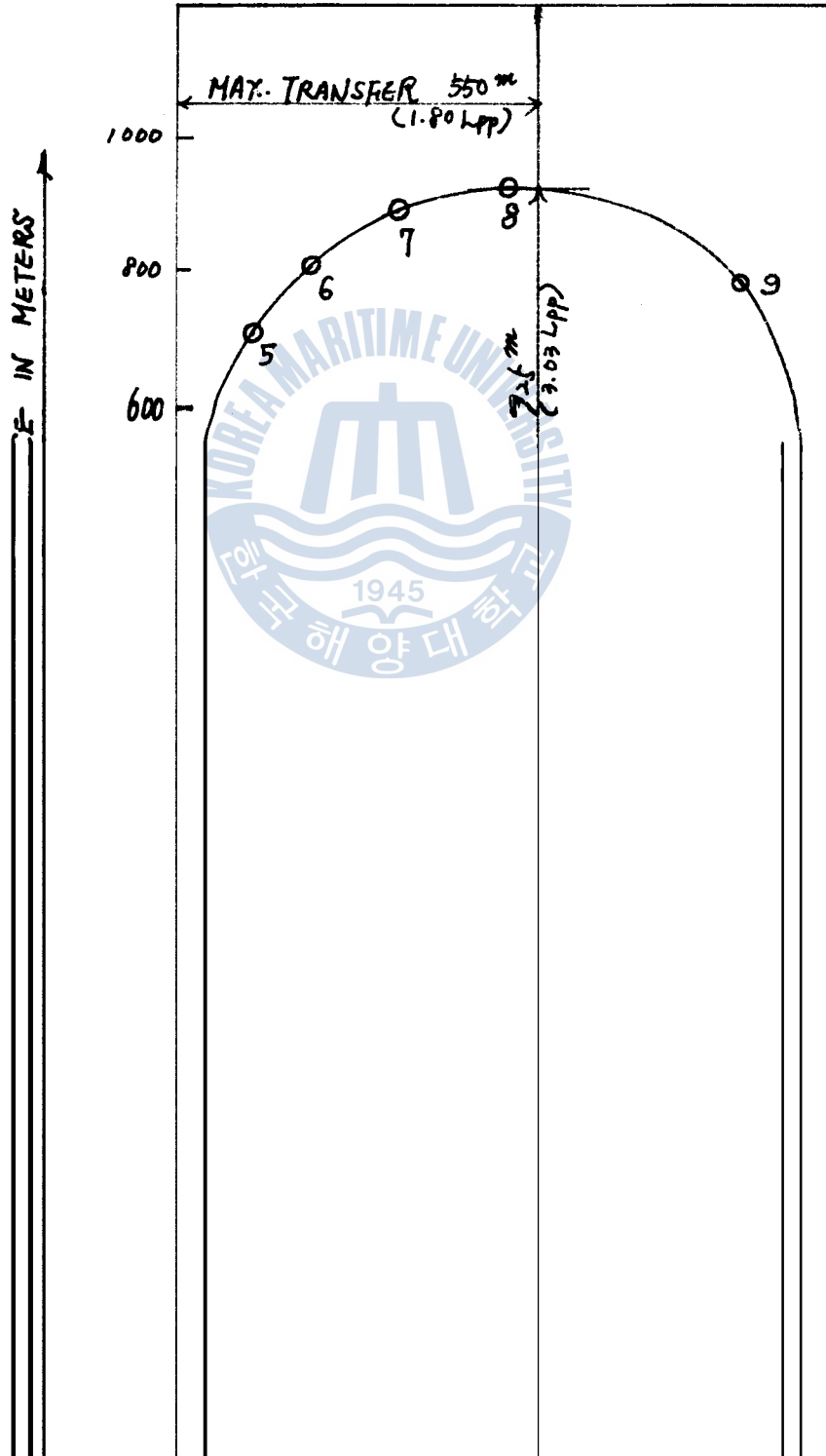
	RUDDER ANGLE	TIME TAKEN FROM OROER
AT WHEEL	35	3 SEC.
AT HELM	35	29 SEC.

MARK	TURNING ANGLE	TIME TAKEN FROM ORDER	SHIP'S SPEED	R. P. M. OF SHAFT
1	0°	0	16.86	90
2	1°	0'—23"	16.79	86
3	5°	0'—36"	16.68	84
4	15°	0'—54"	16.38	83
5	30°	1'—16"	15.66	85
6	45°	1'—33"	14.85	85
7	60°	1'—52"	13.60	85
8	90°	2'—31"	11.35	84
9	135°	3'—40"	8.42	82
10	180°	5'—03"	6.36	81
11	225°	6'—34"	5.24	81
12	270°	8'—10"	4.82	80
13	315°	9'—46"	4.77	80
14	360°	11'—25"	4.75	79

NORMAL RIGHT TURNING
FULLY LOADED CONDITION

d_f : 19.64m
 d_a : 19.67m
 d_m : 19.66m
Trim : 0.03m(STERN)
Disp. : 268,097t

Rudder Angle: 35°
Sea State : Slight
Sea Depth : 860m
Weather : Blue Sky



<表 2>

NORMAL TURNING TRIAL

(FULLY LOADED COND.)

RIGHT TURNING TRIAL

INITIAL SHIP'S SPEED: 16.86 KNOTS

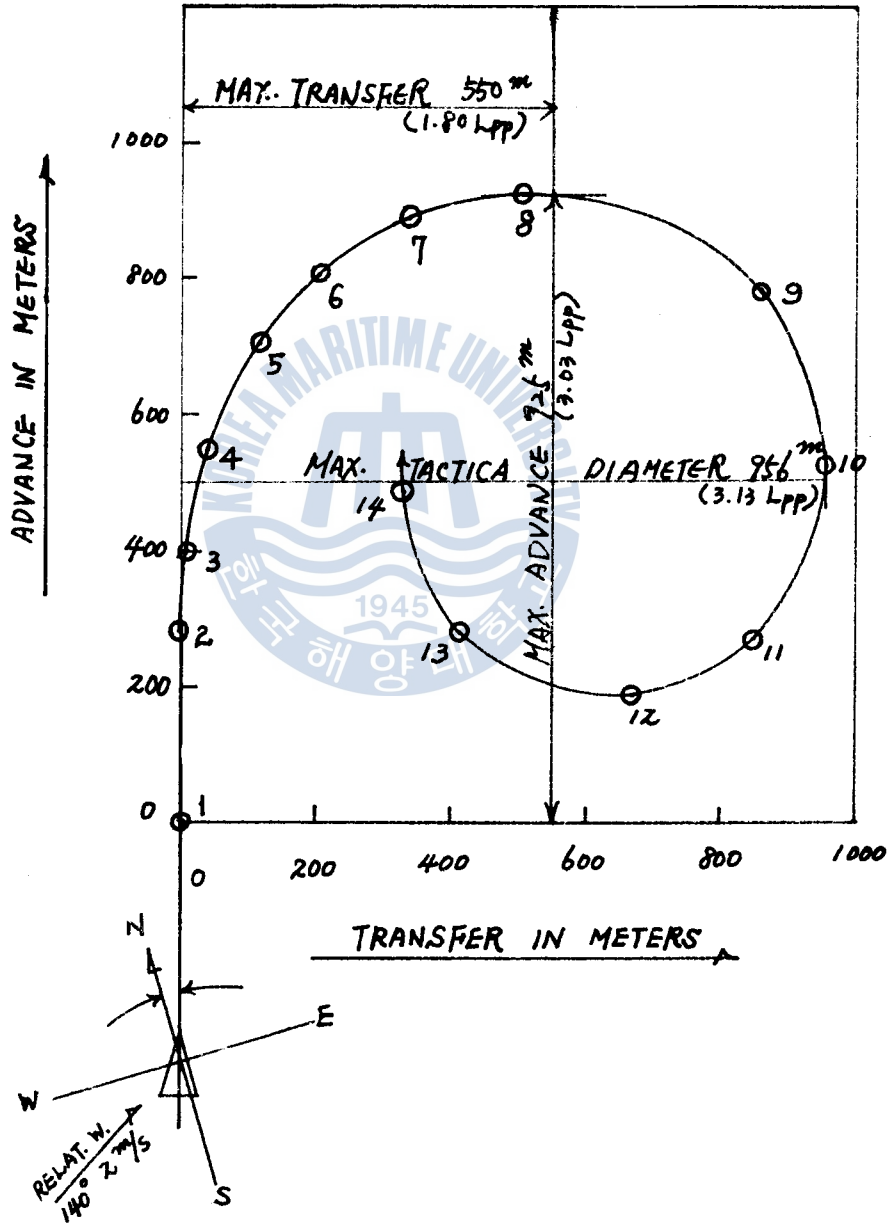
	RUDDER ANGLE	TIME TAKEN FROM OROER
AT WHEEL	35	3 SEC.
AT HELM	35	29 SEC.

MARK	TURNING ANGLE	TIME TAKEN FROM ORDER	SHIP'S SPEED	R. P. M. OF SHAFT
1	0°	0	16.86	90
2	1°	0'—23"	16.79	86
3	5°	0'—36"	16.68	84
4	15°	0'—54"	16.38	83
5	30°	1'—16"	15.66	85
6	45°	1'—33"	14.85	85
7	60°	1'—52"	13.60	85
8	90°	2'—31"	11.35	84
9	135°	3'—40"	8.42	82
10	180°	5'—03"	6.36	81
11	225°	6'—34"	5.24	81
12	270°	8'—10"	4.82	80
13	315°	9'—46"	4.77	80
14	360°	11'—25"	4.75	79

NORMAL RIGHT TURNING
FULLY LOADED CONDITION

d_f : 19.64m
 d_s : 19.67m
 d_m : 19.66m
Trim : 0.03m(STERN)
Disp. : 268,097t

Rudder Angle: 35°
Sea State : Slight
Sea Depth : 860m
Weather : Blue Sky



<그림 8>

<表 3>

NORMAL TURNING TRIAL

(FULLY LOADED COND.)

LEFT TURNING TRIAL

INITIAL SHIP'S SPEED: 16.28 KNOTS

	RUDDER ANGLE	TIME TAKEN FROM ORDER
AT WHEEL	35	3 SEC.
AT HELM	35	24.5 SEC.

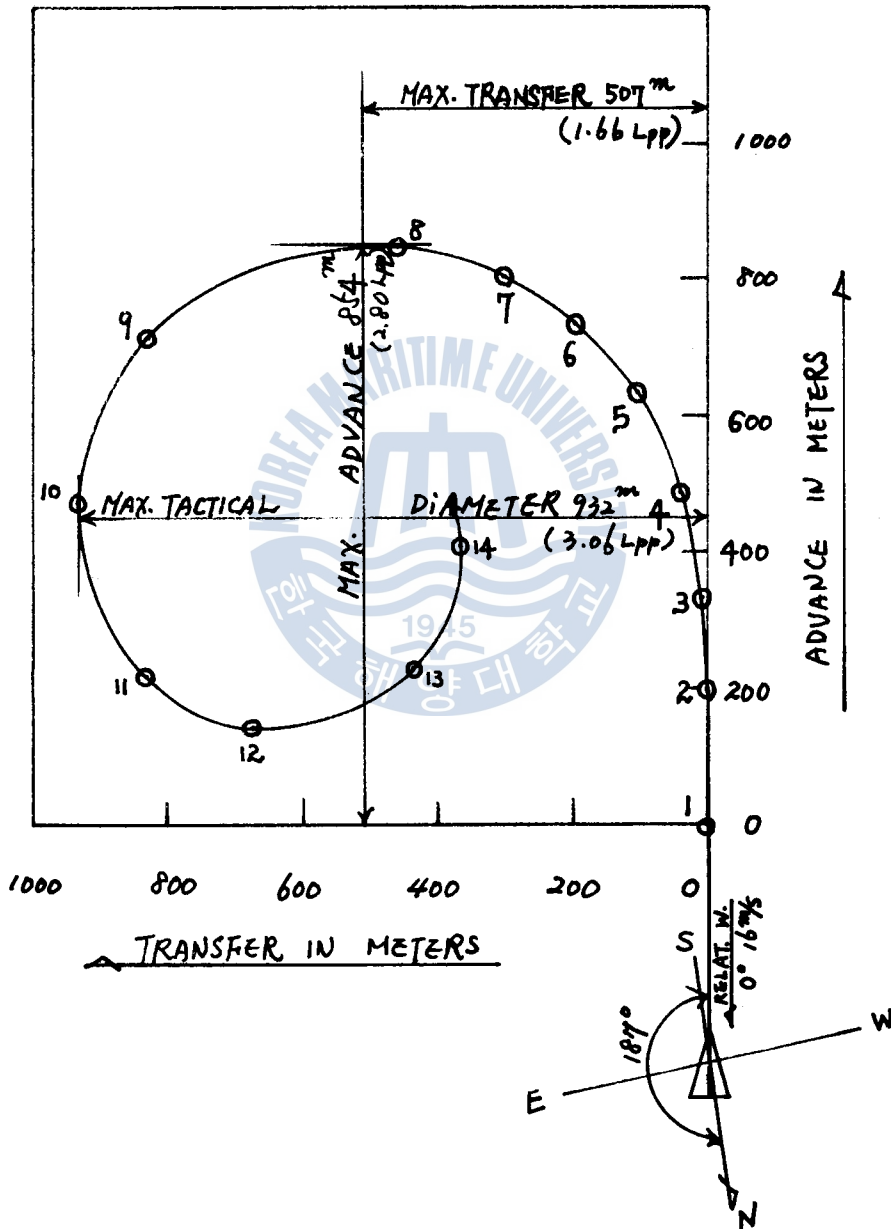
MARK	TURNING ANGLE	TIME TAKEN FROM ORDER	SHIP'S SPEED	R. P. M OF SHAFT
1	0°	0	16.8	90
2	1°	0'--16"	16.16	90
3	5°	0'--30"	16.00	90
4	15°	0'--50"	15.61	89
5	30°	1'--11"	15.05	88
6	45°	1'--29"	14.35	89
7	60°	1'--48"	13.29	87
8	90°	2'--26"	11.01	86
9	135°	3'--34"	8.45	85
10	180°	4'--52"	6.54	84
11	225°	6'--18"	5.26	84
12	270°	7'--50"	4.50	84
13	315°	9'--26"	4.15	83
14	360°	11'--03"	3.97	82

NORMAL LEFT TURNING

FULLY LOADED CONDITION

d_f : 19.64m
 d_a : 19.67m
 d_m : 19.66m
 Trim : 0.03m(STERN)
 Disp. : 268,097t

Rudder Angle : 35°
 Sea State : Slight
 Sea Depth : 1,040m
 Weather : Blue Sky



<그림 9>

〈表 4〉

NORMAL TURNING TRIAL

(BALLAST COND.)

RIGHT TURNING TRIAL

INITIAL SHIP'S SPEED: 18.52 KNOTS

	RUDDER ANGLE	TIME TAKEN FROM ORDER
AT WHEEL	35	1.0 SEC.
AT HELM	35	29.5 SEC.

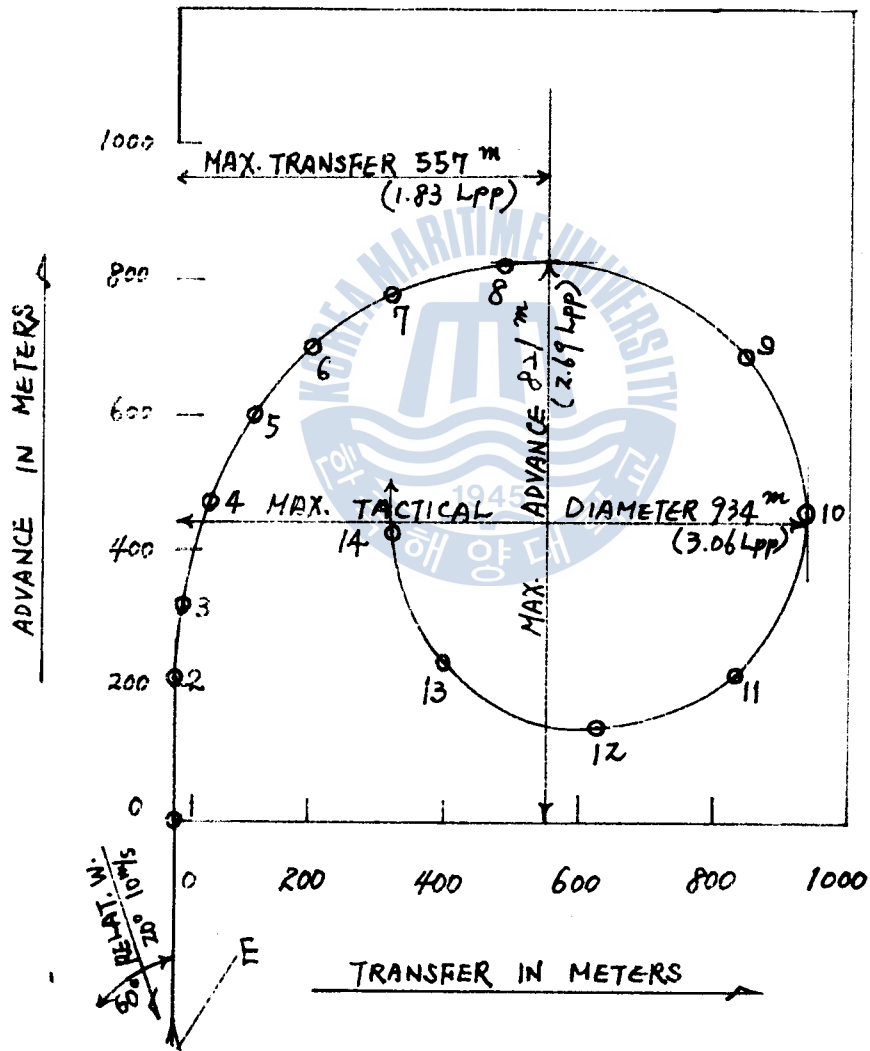
MARK	TURNING ANGLE	TIME TAKEN FROM ORDER	SHIP'S SPEED	R. P. M OF SHAFT
1	0°	0	18.52	89
2	1°	0'—12"	18.51	89
3	5°	0'—23"	18.40	88
4	15°	0'—39"	18.00	88
5	30°	0'—57"	17.10	89
6	45°	1'—13"	15.81	88
7	60°	1'—32"	14.09	86
8	90°	2'—10"	11.15	84
9	135°	3'—20"	7.80	82
10	180°	4'—37"	6.20	81
11	225°	6'—03"	6.03	81
12	270°	7'—28"	5.85	82
13	315°	8'—52"	5.71	82
14	360°	10'—13"	5.69	81

NORMAL RIGHT TURNING

BALLAST CONDITION

d_f : 8.81m
 d_o : 11.12m
 d_m : 9.97m
 Trim : 2.31m(STERN)
 Disp : 128,152t

Rudder Angle : 35°
 Sea State : Slight
 Depth : 1,040m
 Weather : Cloudy



<그림 10>

〈表 5〉

NORMAL TURNING TRIAL

(BALLAST COND.)

LEFT TURNING TRIAL

INITIAL SHIP'S SPEED: 18.57 KNOTS

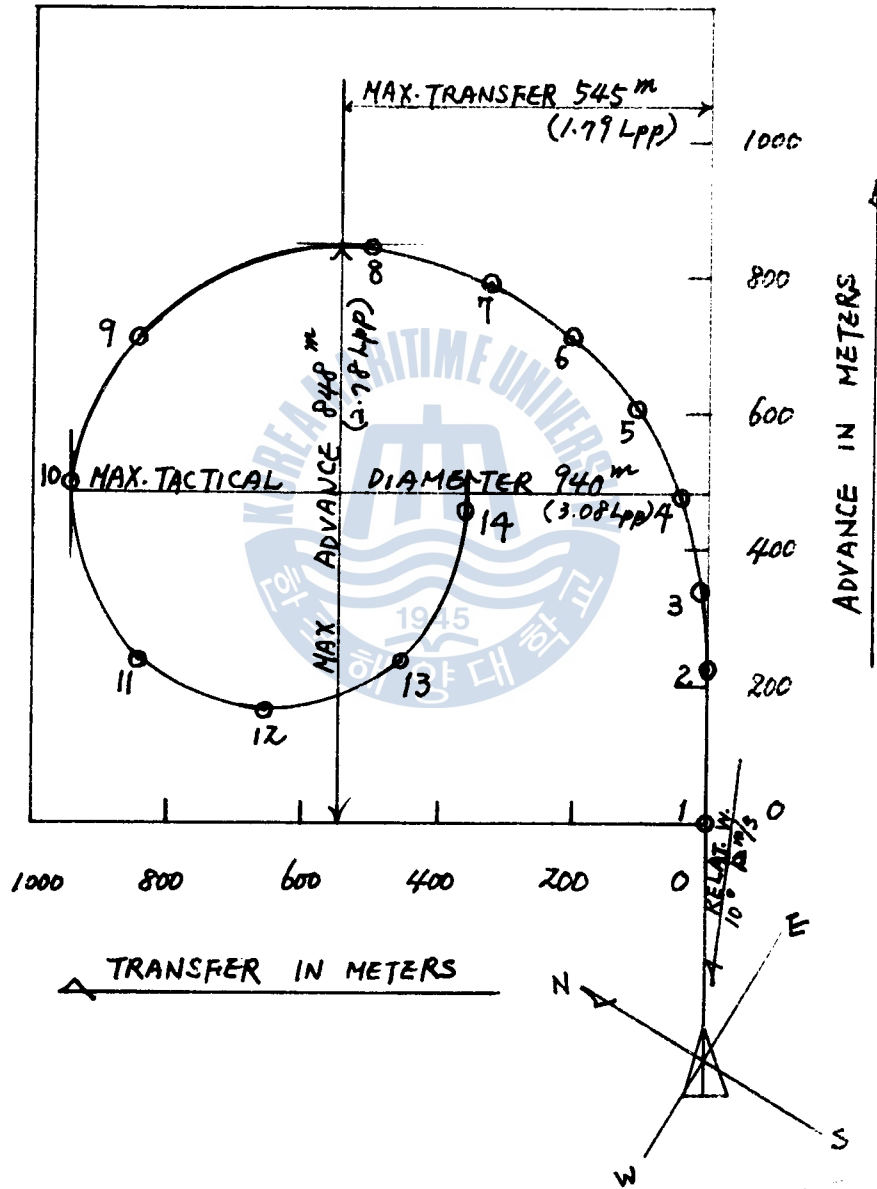
	RUDDER ANGLE	TIME TAKEN FROM ORDER
AT WHEEL	35	1 SEC
AT HELM	35	28 SEC

MARK	TURNING ANGLE	TIME TAKEN FROM ORDER	SHIP'S SPEED	R. P. M. OF SHAFT
1	0°	0	18.57	89
2	1°	0'—14"	18.51	88
3	5°	0'—26"	18.29	88
4	15°	0'—41"	17.78	87
5	30°	0'—58"	16.95	89
6	45°	1'—16"	15.80	89
7	60°	1'—34"	14.45	88
8	90°	2'—14"	11.06	87
9	135°	3'—21"	8.10	85
10	180°	4'—38"	6.40	84
11	225°	6'—02"	5.50	84
12	270°	7'—24"	5.41	84
13	315°	8'—47"	5.33	84
14	360°	10'—10"	5.28	85

NORMAL LEFT TURNING
BALLAST CONDITION

d_f : 8.81m
 d_a : 11.12m
 d_m : 9.97m
Trim : 2.31m(STERN)
Disp. : 128,152t

Rudder Angle : 35°
Sea State : Slight
Sea Depth : 1,260m
Weather : Cloudy



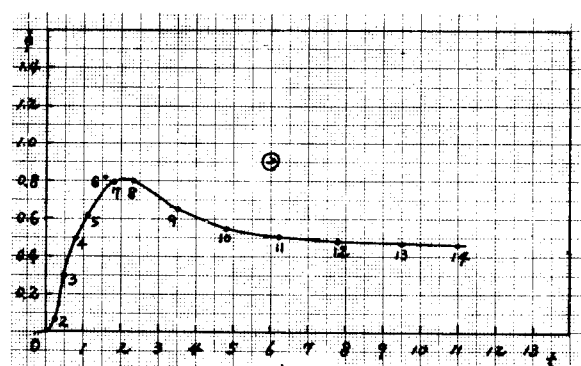
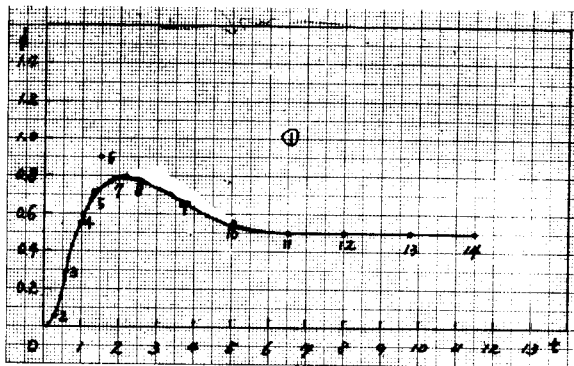
<그림 11>

2. 角速度表 및 角速度特性曲線

다음의 角速度表 및 角速度特性曲線은 1項의 資料에 依하여 計算하여 그림으로 表示한 것이다.

〈表 6〉 “ALTHEA”; Full Loaded, F/A, F. Rudder

① RIGHT TURNING			② LEFT TURNING		
순 번	각속도	경과시간	순 번	각속도	경과시간
1	: 0	0	1	: 0	0
2	: 0.04	0'—23"	2	: 0.06	0'—16"
3	: 0.31	0'—36"	3	: 0.29	0'—30"
4	: 0.56	0'—54"	4	: 0.50	0'—50"
5	: 0.68	1'—16"	5	: 0.70	1'—11"
6	: 0.88	1'—33"	6	: 0.83	1'—29"
7	: 0.79	1'—52"	7	: 0.80	1'—48"
8	: 0.77	2'—31"	8	: 0.80	2'—26"
9	: 0.65	3'—40"	9	: 0.66	3'—34"
10	: 0.54	5'—03"	10	: 0.58	4'—52"
11	: 0.50	6'—34"	11	: 0.52	6'—18"
12	: 0.47	8'—10"	12	: 0.49	7'—50"
13	: 0.47	9'—46"	13	: 0.47	9'—26"
14	: 0.46	11'—25"	14	: 0.46	11'—03"



〈그림 12〉(a)

(b)

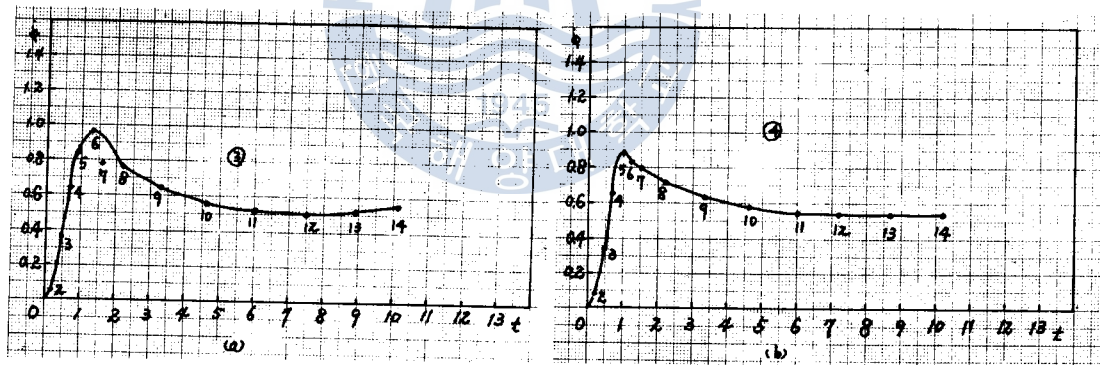
〈表 7〉

“ALTHEA”: BALLAST COND. F/A, F. Rudder

③ RIGHT TURNING

④ LEFT TURNING

순 번	각속도	경과시간	순 번	각속도	경과시간
1	: 0	0	1	: 0	0
2	: 0.08	12"	2	: 0.07	14"
3	: 0.36	23"	3	: 0.33	26"
4	: 0.63	39"	4	: 0.67	41"
5	: 0.83	57"	5	: 0.88	58"
6	: 0.94	1'-13"	6	: 0.83	1'-16"
7	: 0.79	1'-32"	7	: 0.83	1'-34"
8	: 0.79	2'-10"	8	: 0.75	2'-14"
9	: 0.64	3'-20"	9	: 0.67	3'-21"
10	: 0.58	4'-37"	10	: 0.58	4'-38"
11	: 0.52	6'-03"	11	: 0.54	6'-02"
12	: 0.53	7'-28"	12	: 0.55	7'-24"
13	: 0.54	8'-52"	13	: 0.54	8'-47"
14	: 0.56	10'-13"	14	: 0.54	10'-10"



(a)

(b)

그림 13

IV. 試驗資料分析에 對한 考察 및 資料를 얻기 爲한 旋回試驗方法에 對한 提言

1. 試驗資料分析에 對한 考察

本試驗은 바람이 相當히 強한 때에 行하였으므로 風壓이 試驗에 相當히 介入되었으리라 생각된다. 例를 들면 Ballast Condition때의 Right turning test와 Left turning test에는 다같이 12 Point에서 角速度는 振動비 似的한 形態가 나타나지만 이것은 바람의 影響에 依한 것인지 $\eta > 1$ 일때의 影響인지 正確히 判斷할 수 없으나 風壓의 影響에 依한 것으로 생각된다. 針路安定性試驗資料에 依하면

本船은 針路安定性이 있는 船舶으로 判斷되었고 角速度特性曲線도 그것을 明白히 表示하고 있다. Fully loaded condition 때와 Ballast condition 때의 角速度를 分析한 4個의 特性曲線은 모두 同一한 모양을 하고 있으며 따라서 特定船舶의 角速度特性曲線은 그 船舶의 旋回特性을 나타낸다고 볼 수 있다.

2. 資料를 얻기 爲한 旋回試驗方法

針路安定性을 判斷하기 爲한 旋回試驗은 可能하면 速力이 낮고 舵角이 적은 것이 바람직스럽다. 그 理由는 實際의 船舶에서는 前進全速時에 5° 内外의 小角度範圍의 舵角에서 針路不安定이 생기고 있기 때문이다. 그러하기 때문에 針路安定性을 判斷하기 爲한 旋回試驗은 Slow speed에서 旋回試驗을 하되 旋回試驗의 初期에는 約 20° 의 舵角으로 確實하게 旋回를 始作하고 回頭가 始作되는 即時로 舵角을 10° 内外의 一定舵角으로 維持하면서 時間과 角變位量을 記錄하여 角速度特性曲線을 그릴 수 있는 資料를 얻도록 하여야 할 것이다.

V. 結 論

以上の 研究分析을 通하여 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

1. 大型船의 針路安定性은 船体重心點이 流體力學的인 對稱中心으로부터 取하는 方向과 距離에 依하여 決定된다.
2. 한 船舶의 旋回圈試驗을 行한 時 本試驗에 追加하여 低速에서 小角度舵角으로 旋回試驗을 行하고 速力과 角變位量을 記錄하여 角速度特性曲線을 만들면 針路安定性도 同時에 判別할 수 있다.
3. 小型船의 角速度整定은 原針路에서 約 90° 程度의 角變位量이 생겼을 때 이루어지나 大型船에 있어서는 原針路로부터 約 180° 程度의 角變位가 생겼을 때 角速度整定이 이루어진다.

參 考 文 獻

1. 尹点東, “巨大型船의 操船理論과 實務”, 重成出版社, 釜山(1976), pp. 8—14.
2. 尹点東, “操縱性指數에 의한 衝突回避動作의 量的 把握에 관한 研究”, 韓國航海學會誌 第1卷, 第1號 (1977), pp. 30—35.
3. K. J. Rawson, E. C. Tupper, “Basic Ship Theory,” Longman Group Limited, London(1978), pp. 476—500.
4. Philip Mandel, “Principles of Naval Architecture,” SNAME, New York (1967), pp. 463—475.

